

http://pmse.scu.edu.cn

橡胶帘线复合材料界面失效机制

郭晓辉¹, 袁晓静¹, 张泽¹, 刘广永², 邱贺方¹, 崔帆帆¹

(1. 火箭军工程大学 作战保障学院, 西安 710025; 2. 青岛科技大学 橡塑材料与工程教育部重点实验室, 青岛 266042)

摘要:为研究对称角度铺设的橡胶帘线复合材料界面失效机制,采用有限元方法建立了代表性体积元,仿真橡胶帘线复合材料细观层面的应力分布,采用基于能量的Power-law准则仿真帘线与橡胶界面的损伤演化,发现界面的损伤由接触剪切应力与接触压力引起。界面初始刚度为影响界面损伤演化的重要粘接界面参数,初始刚度与界面损伤演化变量正相关。帘线夹角增大会引起帘线所受转矩增大,导致界面失效加剧。

关键字: 橡胶/帘线; 对称角度铺设; 有限元; 代表性体积元; 内聚力接触; 损伤演化

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2022)11-000

橡胶/帘线复合材料作为一种典型的工程材料,广泛应用于轮胎、空气弹簧、输送带及其他橡胶制品,它是由帘线和橡胶基体共同硫化而成。在轮胎和空气弹簧等橡胶制品中,大多使用多角度铺设的橡胶帘线复合材料,材料在变形过程中复杂的应力状态以及橡胶和帘线之间的界面导致其失效情况难以预测,直接影响橡胶制品的安全性能。因此,研究橡胶帘线复合材料的破坏机理具有重要的理论意义和工程应用价值。

过去几十年,人们对橡胶/帘线复合材料的材料特性进行了广泛的研究。早在1964年,Clark^[1]就对橡胶帘线复合材料进行了系统的论述。此后,橡胶帘线复合材料在理论、实验方面都得到了充分的发展,随着计算机技术的不断进步,仿真模拟也更加频繁地应用于橡胶帘线复合材料的研究中。Su等^[2]利用内聚力模型研究了橡胶帘线复合材料搭接结构的失效机理。Singh等^[3]基于内聚力单元研究了基体上界面覆盖率对纤维/基质界面脱粘的影响,揭示了界面的脱粘机制,发现界面首先从基体中剥离。

环境因素对橡胶帘线复合材料失效有重要影响,包括温度、湿度、pH值等。Enganati等^[4]采用多尺度方法研究了间二苯酚-甲醛-乳胶(RFL)界面的初始结构及热处理过程中的演变,证明了在橡胶与

RFL之间存在界面区域,RFL界面相经过热处理后硬度明显增加,不利于基体与纤维之间的黏合。Jamshidi等^[5]发现温度对帘线与橡胶之间的黏合性能有一定的影响,在25~125℃的温度范围内,温度升高导致帘线与橡胶之间的黏合性能下降,但继续升高温度,其黏合力有所回升,这归因于温度对界面结合键的破坏与促进作用。Valantin等^[6]研究了疲劳对间苯二酚-甲醛-乳胶涂敷织物的橡胶帘线复合材料界面性能的影响,发现橡胶帘线界面存在两种破坏机制,一种是橡胶/RFL界面上预先存在的纤维状微裂纹扩展,另外一种则是帘线与RFL界面之间的脱粘。Sheshenin等^[7]对中等大变形下的橡胶帘线复合材料进行了均匀化处理,提出了一种确定大变形情况下橡胶帘线复合材料均匀性质的修正方法。

现有文献基于环境因素对橡胶帘线复合材料界面的影响进行了广泛研究。随着计算机技术的发展,界面失效机制也进一步得到揭示,但大多研究单一角度铺设的橡胶帘线复合材料,对于多角度铺设的橡胶帘线复合材料界面失效机制鲜有报道。本文在细观层面建立了对称角度铺设的橡胶帘线复合材料代表性体积元有限元模型,并在界面处引入内聚力模型,通过仿真结果分析了单轴拉伸状态下界面的失效机制,并分析了界面初始刚度、帘线夹角对界面损伤演化的影响。

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0261

收稿日期:2022-04-04

基金项目:军内科研(WG2020017)

通讯联系人:袁晓静,主要从事装备保障研究,E-mail: yuanxj2003@163.com

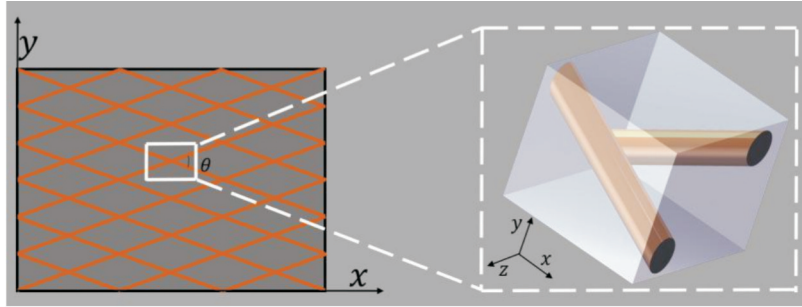


Fig.1 Representative volume element of rubber cord composite material

1 橡胶帘线复合材料细观建模

1.1 代表性体积元模型

帘线增强橡胶复合材料界面性能对其总体力学性能有至关重要的影响,然而实验方法和宏观的有限元建模在研究其界面微观机理方面具有较大的局限性。为了探究帘线增强橡胶复合材料界面微观机理,在细观层面建立其代表性体积单元有限元模型,如 Fig.1 所示。

采用 ABAQUS2020 有限元分析软件对代表性体积元模型进行建模,网格划分如 Fig.2 所示。橡胶基体与帘线均为超弹性材料,橡胶采用的是四节点线性压电四面体单元(C3D4RH),实体帘线采用八节点线性六面体单元(C3D8RH)。基体与帘线之间设置内聚力接触,以模拟界面的损伤行为。在模型右端设置参考点与右端面耦合,模型左端面设置完全固定,对参考点施加沿 X 轴正向的位移,对代表性体积元进行拉伸。

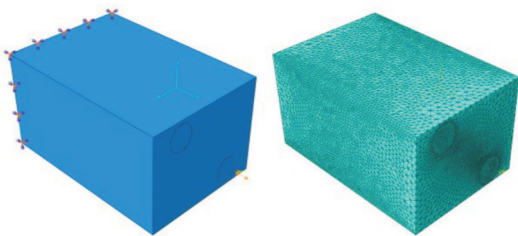


Fig.2 Representative volume element meshing and boundary condition settings

1.2 材料的本构模型及参数求解

1.2.1 橡胶的本构模型:橡胶作为一种超弹性材料,有多种本构关系可以表征其力学行为,然而不同的本构关系适用于不同的情况。选用不同的本构模型对有限元仿真的精度有很大影响,需要根据实验数据及具体情况进行选择。

对文献[8]的数据进行采样,取 0%~25%应变之间的实验曲线,利用 ABAQUS 软件自带的超弹性材

料的本构模型对实验曲线进行拟合,所得拟合曲线如 Fig.3 所示。由图可以看出,Ogden 本构模型和 Yeoh 本构模型都有较好的拟合结果,但在 15%~25%应变之间,Yeoh 本构模型拟合结果优于 Ogden 本构模型,因此选择 Yeoh 本构模型作为橡胶的超弹性本构模型。

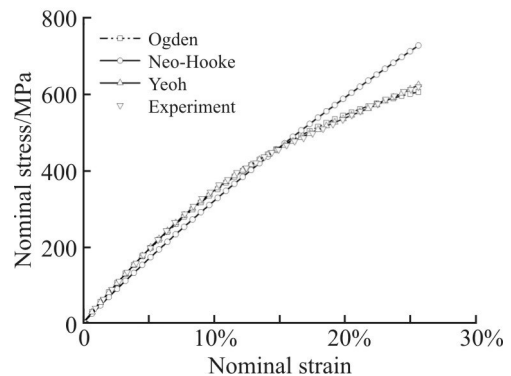


Fig.3 Hyperelastic constitutive model fitting curves and experimental data curve

对橡胶力学性能的描述方法分为 2 类。一类是基于连续介质力学的方法,另一类是基于热力学统计的方法。Yeoh 本构模型属于连续介质力学本构模型中的多项式模型的特殊形式,其应变能函数^[9]为

$$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0}(I_1 - 3)^3 + \sum_{i=1}^3 1/D_i(J_{ci} - 1)^{2i} \quad (1)$$

式中: C_{i0} ——Yeoh 超弹性模型材料参数, C_{10} ——初始剪切模量, C_{20} ——负数,在中等变形时引起软化现象, C_{30} ——正值,表示大变形时的硬化; I_1 ——第一应变不变量; D_i ——材料的压缩系数。

1.2.2 帘线的本构模型:在小应变范围内(0%~2.5%),可以认为帘线属于线弹性材料。经过查阅文献得知,大多数帘线的断裂伸长率在 15%~25%之间,此时将帘线的力学行为描述为线弹性是不准确的,并且会得出错误的仿真结果。因此选择帘线

的力学特性为超弹性。

由于帘线增强复合材料中的帘线采用加捻结构,无法对其进行双轴拉伸和平面拉伸,仅能够得到单轴拉伸实验数据。Marlow 模型是最常用的第一不变量模型,仅使用1个标量函数来定义力学性能,对于仅有单一拉伸数据的情况,采用 Marlow 模型较为合适^[10]。Marlow 模型的应变能函数^[11]为

$$W = W_{\text{dev}}(I_1) + W_{\text{vol}}(J^e) \quad (2)$$

式中: I_1 ——第一应变不变量; J^e ——弹性体积比; 和 W_{dev} 和 W_{vol} ——分别为偏量部分和体积部分。

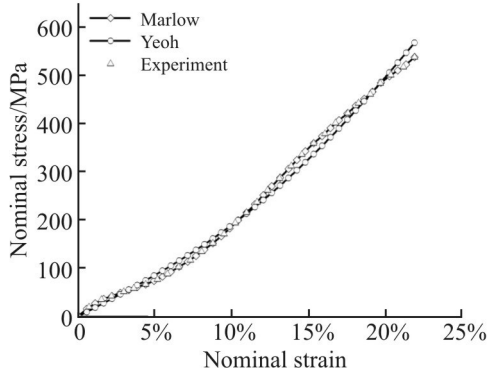


Fig.4 Fitting curves of Hyperelastic constitutive model and cord experimental data curve

对文献[8]的数据进行采样,采用 Abaqus 中的 Marlow 本构模型和 Yeoh 本构模型对帘线的单轴拉伸数据进行了拟合,如 Fig.4 所示。从拟合曲线可以看出,Marlow 模型得到的结果与实验数据有较高的重合度,而 Yeoh 模型误差大于 Marlow 模型。

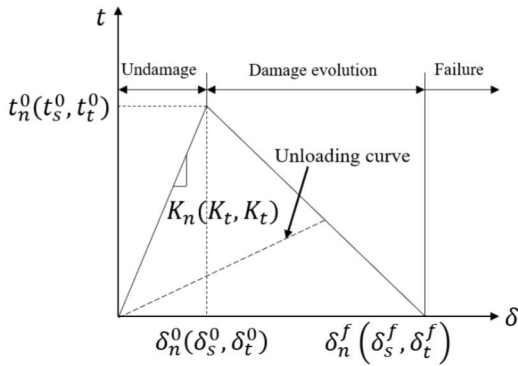


Fig.5 Typical tension-separation curve of cohesion zone bilinear model

2 内聚力模型

内聚力模型(Cohesive zone model, CZM)以作用在界面上的应力与分离量的非线性关系表达界面的粘接行为^[12]。在 ABAQUS2020 软件中,内聚力属性有2种添加形式,分别为内聚力单元与内聚力接

触。本文采取内聚力接触方式,即在帘线与橡胶基体之间设置面-面接触,将接触属性定义为内聚力接触。

双线性内聚力模型拉伸-分离曲线如 Fig.5 所示, K_n, K_s 和 K_t 分别为黏胶层破坏前界面的法向、第一和第二剪切方向的初始刚度; δ 是界面的分离位移; δ^0 为拉伸载荷最大时界面的张开位移; δ^f 为黏胶层完全失效时界面的张开位移。

选择最大应力准则作为损伤起始判据,表达式如式(3)

$$\text{MAX} \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (3)$$

当法向、第一和第二剪切应力中任意一项超过其临界应力,则界面开始发生损伤。损伤扩展选择基于能量的 Power-Law 准则,Power-Law 准则指出,混合模式下界面的失效由导致单个失效(法向、第一剪切和第二剪切)模式所需的能量共同决定。其表达式如式(4)

$$\left(\frac{G_n}{G_{nc}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_s}{G_{sc}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_t}{G_{tc}} \right)^\alpha = 1 \quad (4)$$

式中: G_t, G_n 和 G_m ——分别为法向、第一和第二切向裂纹扩展的表面能; G_{tc}, G_{nc} 和 G_{mc} 分别为法向、第一和第二切向裂纹扩展的临界表面能,即图中拉伸分离曲线所包围的面积; α 为材料系数,由黏胶材料决定。

损伤演化变量(D)在输出变量中表示为 CSD-MG,代表损伤的程度。ABAQUS 对损伤演化的定义如下:如图所示,当界面的应力状态满足损伤起始判据时,界面进入损伤演化阶段,即 Fig.5 中的 Damage evolution 阶段,此状态下的卸载曲线总是朝着拉伸分离曲线原点方向进行,如 Fig.5 虚线所示,重新加载也沿此路径进行,直到重新达到线性损伤阶段。损伤演化变量的定义如式(5)和式(6)

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\text{max}} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\text{max}} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (5)$$

$$\delta_m^f = \frac{2G_C}{T_{\text{eff}}^0} \quad (6)$$

式中: T_{eff}^0 ——损伤初始时的有效牵引力; δ_m^{max} ——加载期间有效分离位移的最大值。当 $D=0$ 时,代表界面处于完好,当 D 在 0~1 之间时,界面处于损伤演化状态; $D=1$ 时,界面失效。

Tab.1 Cohesive zone model parameters^[2]

Parameter	Initial stiffness/ (N·m ⁻¹)			Interface strength /MPa			Fracture toughness		Index	
	K_{11}	K_{22}	K_{33}	τ_n	τ_s	τ_t	G_{IC}	G_{IIC}	G_{IIIC}	α
Value	2000	2000	2000	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2

内聚力模型参数取自文献[2],如 Tab.1 所示。

3 结果与讨论

3.1 帘线增强橡胶界面失效机制

Fig.6 为帘线夹角为 40° 的代表性体积元模型在加载的初始阶段的局部应力分布,可以看出帘线的周围存在明显的应力集中,达到 34.6 MPa,明显高于基体其他部分的应力。这表明在拉伸初始阶段,与帘线黏合的橡胶承受较大的应力。



Fig.6 Local stress distribution in the initial loading phase

进一步分析橡胶基体与帘线接触面加载过程中的接触应力。Fig.7 和 Fig.8 所示为加载过程中接触面上的法向接触应力 (CPRESS) 与第一剪切应力 (CSHEAR1) 分布。在帘线的上下两侧分布有较大的法向接触应力与第一剪切应力。法向接触应力为负值,表明接触面受法向拉力,第一剪切应力在交叉的 2 根帘线上方向相反,并由帘线中部逐渐沿轴向扩展,在接触面上绝大部分区域,第一剪切应力达到 4.34 MPa,接近第一剪切应力的临界值 4.4 MPa。

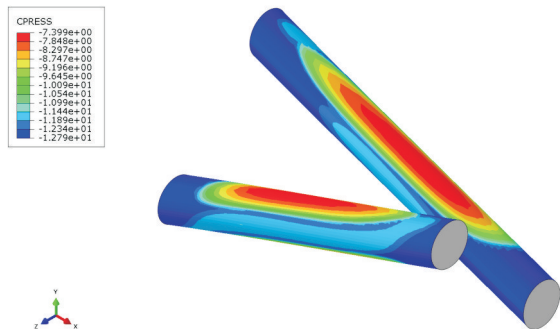


Fig.7 Cord/rubber interface contact pressure

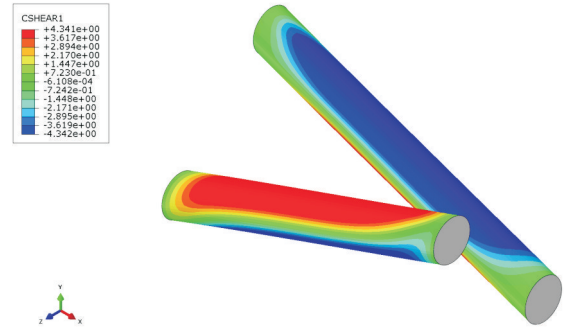


Fig.8 First contact shear stress of the cord/rubber interface

Tab.2 为帘线夹角为 60° 的代表性体积元不同加载位移下的损伤演化变量分布。界面损伤主要分布在帘线的上下两侧,与接触应力的分布情况相匹配。随着加载位移的增大,损伤逐渐在帘线的上下两侧沿轴向扩展,并且损伤演化变量逐渐增大。损伤演化变量在 Fig.9 红色虚线框所示部位达到最大值 1,表明在该位置的界面完全失效。Fig.10 为损伤演化扩展的示意图,损伤由帘线的一端逐渐向中间扩展,相交的 2 根帘线损伤扩展路径对称分布,界面初始失效发生在帘线夹角位置,并沿帘线轴向逐渐扩展,如 Fig.10 所示。

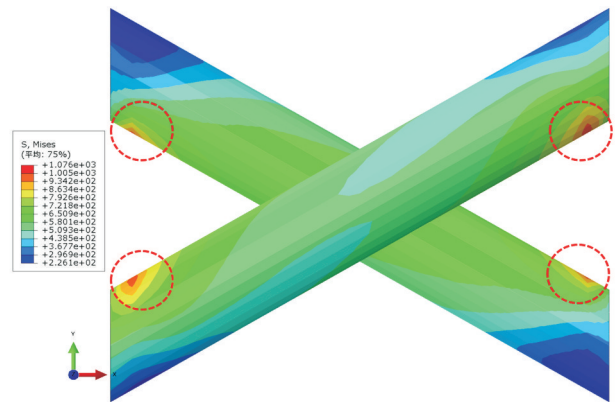


Fig.9 Local stress distribution on the cord surface

界面失效首先发生在 Fig.10 所示红色虚线位置,随后逐渐沿图中箭头方向扩展,上下两侧扩展方向相反,失效面积逐渐增大。由于在加载过程中帘线左右两侧均受顺时针方向的转矩,并且在界面初始失效位置所受转矩最大,沿图中红色箭头方向逐渐减小,这与界面损伤演化的扩展规律一致。

Tab.2 Damage evolution of the rubber/cord composite interface

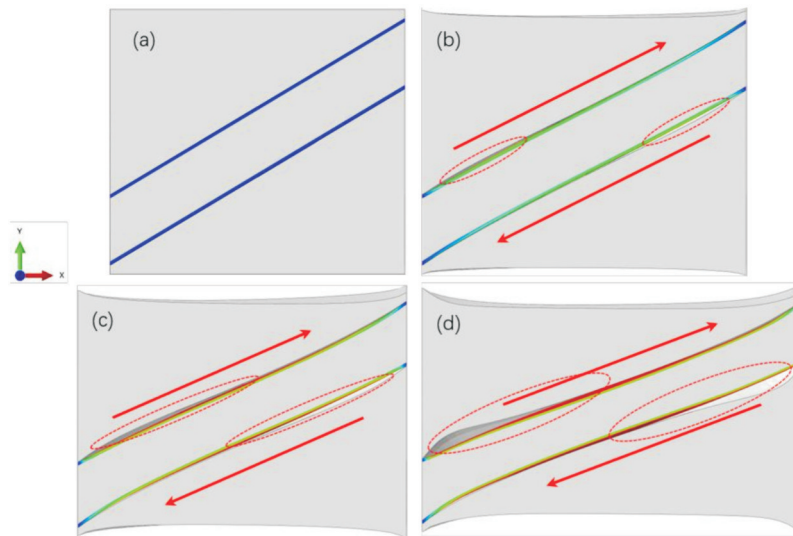
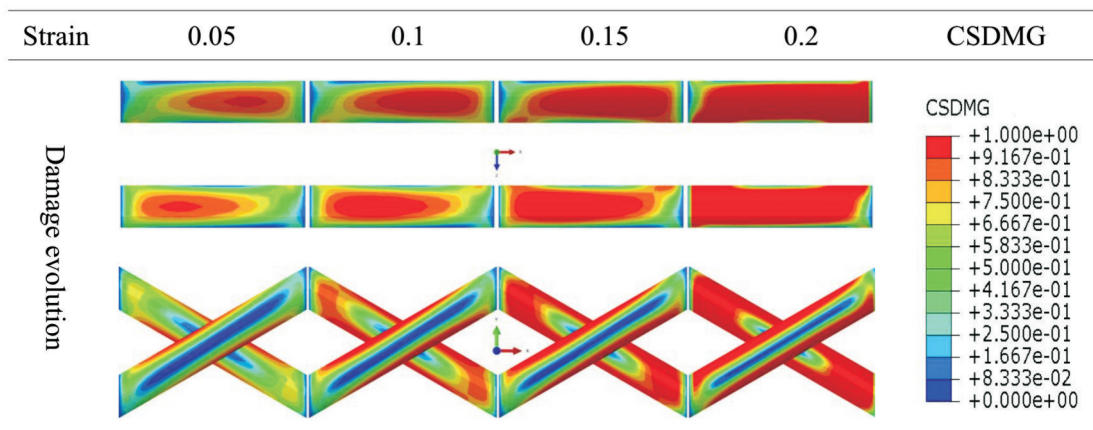


Fig.10 Failure process of the rubber/cord composite material interface

(a): $\varepsilon = 0$; (b) : $\varepsilon = 0.05$; (c): $\varepsilon = 0.1$; (d): $\varepsilon = 0.2$

Fig.9为加载过程中帘线表面局部应力分布,可以看到在红色虚线位置存在应力集中,与初始失效位置相吻合,且沿帘线轴向递减。

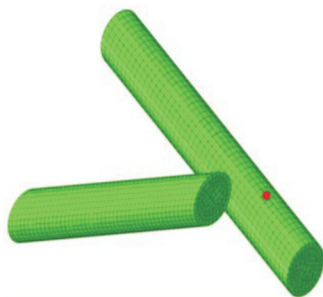


Fig.11 Node selection location

3.2 界面初始刚度对损伤演化的影响

界面在橡胶基体与帘线之间传递载荷,界面的渐进损伤导致基体中的应力持续增加,载荷最终完全由基体承受,导致基体断裂^[13]。在选用文献[2]内聚力参数的基础上,设置不同的界面初始刚度,得到其对界面失效的影响规律。

在黏性接触中,刚度越大,接触面之间越不易产生相对运动。在相同的力作用下,刚度大的粘接面产生相对位移更小。但当不同刚度的粘接面之间产生相对位移时,刚度较大的粘接面之间,会承受更大的载荷,在断裂韧性相同的情况下,会较早开始产生损伤。在断裂韧性相同的情况下,设置了

Tab.3 Cohesive zone model parameters for initial stiffness of different interfaces

Parameter	Initial stiffness/($N \cdot m^{-1}$)			Interface strength/MPa			Fracture toughness			Index	
	K_{11}	K_{22}	K_{33}	τ_n	τ_s	τ_t	G_{IC}	G_{IIC}	G_{IIIC}	α	
Orientation											
Value1	1000	1000	1000	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	
Value2	1200	1200	1200	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	
Value3	1400	1400	1400	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	
Value4	1600	1600	1600	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	
Value5	1800	1800	1800	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	
Value6	2000	2000	2000	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	
Value7	2200	2200	2200	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	
Value7	2400	2400	2400	13	4.4	4.4	0.8	2.4	2.4	2	

7个不同的黏性接触刚度值,见 Tab.3,其他模型设置不变。

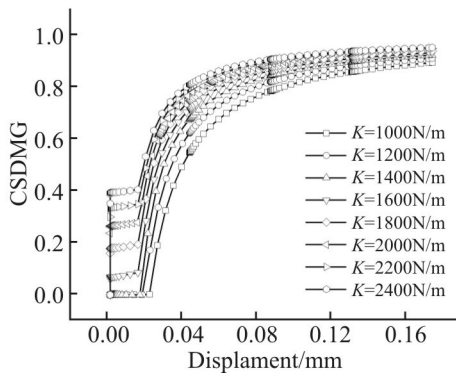


Fig.12 Variation law of damage evolution variable with displacement

考虑到加载过程中 Fig.11 所示结点附近损伤较为明显,因此选取接触面 Fig.11 所示位置结点,提取 8 种不同刚度下该结点损伤演化变量随该点位移的变化曲线,如图 Fig.12 所示。不同界面初始刚度损伤演化变量变化规律不同, Fig.12 中有 2 种不同的变化规律。初始刚度在 1000~1400 N/m 之间时,损伤演化变量在加载初始阶段为 0,表明该阶段界面完好,当加载到一定阶段时,损伤演化变量开始呈指数函数规律增加,其增长规律符合如 $y=y_0+A_1e^{-x/t_1}+A_2e^{-x/t_2}+A_3e^{-x/t_3}$ 指数函数的形式。当初始刚度超过 1400 N/m,加载初始阶段损伤演化变量发生突变,且刚度越大初始的损伤演化变量越高,随后经历线性增长阶段,最后进入指数函数增长。综合 2 种变化规律,刚度对界面的损伤有两方面影响:一是界面初始刚度越高,界面在整个加载过程中的损伤程度越大,图中位移相同时,初始刚度较高的模型 D 更大;二是刚度越高,界面越早发生损伤,从图中可以看出,刚度越高,损伤演化进入指数增长阶段的位移越小。

3.3 帘线夹角对界面失效的影响

分别建立了帘线夹角分别为 0° , 20° , 30° , 40° , 50° 和 60° 的代表性体积元模型。施加载荷,使其具有相同的名义应变。

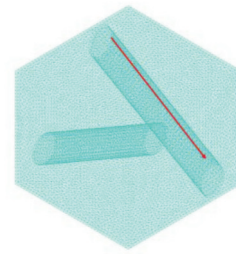


Fig.13 Path diagram

在模型接触面上取 Fig.13 所示位置沿轴线方向的路径,在各模型处于相同名义应变的时刻,绘出各模型沿路径上的损伤演化变量曲线,为便于对照,对路径进行归一化处理。

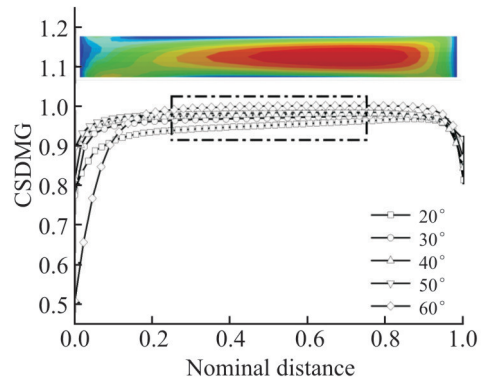


Fig.14 Distribution of damage evolution variables along the path of different cord angle models

如图 Fig.14 所示为不同帘线夹角模型在名义应变为 25% 时,路径上的损伤演化变量分布。可以看出,帘线夹角越大,其平均损伤演化变量越大,损伤

程度越高。另外可以发现,在 Fig.14 中虚线框范围内,刚度下降率均沿路径起点至终点逐渐增大。

仿真结果显示,在加载过程中,不同帘线初始夹角的模型,帘线应力集中的位置均与 Fig.9 红色虚线位置相同。Fig.15 为接触面 S, Mises 应力最大值随帘线初始夹角的变化规律。随着角度的增加,S, Mises 应力最大值随之增加,表明帘线所受转矩逐渐增大,与损伤演化变量遵循相同的变化规律。这表明,角度导致加载过程中帘线所受转矩增大,引起帘线表面应力增加,加剧了界面的损伤。

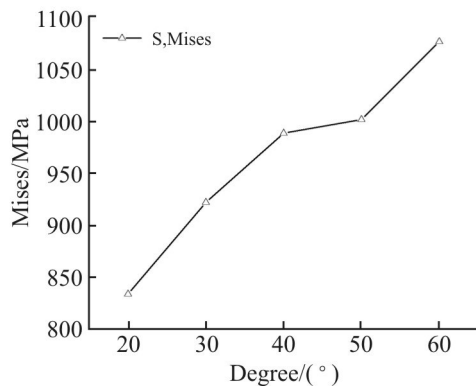


Fig.15 The maximum value of S, Mises stress with initial cord angle

4 结论

通过有限元方法创建了橡胶帘线复合材料代表性体积元模型,研究了在单轴拉伸状态下橡胶帘线复合材料的界面失效机制。通过内聚力接触模型探讨了不同参数对界面损伤演化的影响规律。

(1) 橡胶帘线复合材料的界面损伤主要发生在帘线的上下两侧,并随着加载的进行沿轴向扩展。损伤最严重的位置发生在帘线两端夹角内侧的位置,如 Fig.9 所示。原因在于帘线该部位承受较大的转矩,因此在接触面上出现应力集中,导致该位置界面损伤程度最大。

(2) 界面初始刚度是影响界面损伤演化的重要参数。刚度越大,相同位移下界面损伤演化变量越大,损伤越明显。

(3) 帘线夹角是影响界面性能的重要结构参数,拉伸方向与帘线之间的夹角导致帘线受转矩作用,接触面法向拉伸应力引起界面损伤。当帘线夹角更大时,帘线所受转矩更大,因此界面损伤也更严重。

参考文献:

- [1] Clark S K. A review of cord-rubber elastic characteristics[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1964, 37: 1365-1390.
- [2] Su B, Liu S, Zhang P, *et al.* Mechanical properties and failure mechanism of overlap structure for cord-rubber composite[J]. Composite Structures, 2021, 274: 114350.
- [3] Singh D, Vaidya A, Thomas V, *et al.* Finite element modeling of the fiber-matrix interface in polymer composites[J]. Journal of Composites Science, 2020, 4:58.
- [4] Enganati S K, Addiego F, Fernandes J P C, *et al.* Multiscale characterization of the interfacial region in flexible rubber composites: initial structure and evolution upon thermal treatment [J]. Polymer Testing, 2021, 98: 107203.
- [5] Jamshidi M, Afshar F, Mohammadi N, *et al.* Study on cord/rubber interface at elevated temperatures by H- pull test method[J]. Applied Surface Science, 2005, 249: 208-215.
- [6] Valantin C, Lacroix F, Deffarges M P, *et al.* Interfacial damage on fatigue-loaded textile-rubber composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132:41346.
- [7] Sheshenin S V, Yikun D. Homogenization of rubber-cord layers at moderately large deformations[J]. Mechanics of Composite Materials, 2021, 57: 275-286.
- [8] 高峰, 姚穆. 聚酰胺6帘线/天然橡胶复合材料中纤维体积含量对拉伸性能的影响[J]. 中国纺织大学学报, 1996(3): 23-30.
- [9] Gao F, Yao M. Effect of fiber volume content on tensile properties in polyamide 6 cord/natural rubber composites[J]. Journal of China Textile University, 1996(3): 23-30.
- [9] Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63(5): 792-805.
- [10] 罗行. 高应变率下帘线/橡胶复合材料结构的力学性能研究 [D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2021.
- [10] Luo X. Mechanical properties of cord/rubber composite structures at high strain rates[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology,2021.
- [11] Hesebeck O. Transformation of test data for the specification of a viscoelastic Marlow model[J]. Solids, 2020, 1: 2-15.
- [12] 李龙. 车身单搭接粘接接头静强度性能试验及强度预测方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [12] Li L. Research on static strength performance test and strength prediction method of single lap bonded joints of body[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [13] Jha N K, Nackenhorst U. Fatigue life prediction of cord - rubber composite structures based on progressive damage analysis[J]. Engineering Computations, 2018, 35: 2215-2233.

Interfacial Failure Mechanism of Rubber Cord Composites

Xiaohui Guo¹, Xiaojing Yuan¹, Ze Zhang¹, Guangyong Liu², Hefang Qiu¹, Fanfan Cui¹

(1. *Combat Support Academy, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China*; 2. *Key Laboratory of Rubber-Plastics, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China*)

ABSTRACT: In order to study the interface failure mechanism of rubber cord composites laid at symmetrical angles, a representative volume element was established by the finite element method to simulate the stress distribution of the rubber cord composites at the mesoscopic level, and the energy-based Power-law criterion was used to simulate the damage evolution. The damage evolution of the cord/rubber interface shows that the interface damage is caused by contact shear stress and contact pressure. The initial interface stiffness is an important bonding interface parameter that affects the interface damage evolution, and the initial stiffness is positively correlated with the interface damage evolution variable. The increase in the included angle of the cord will cause the torque on the cord to increase, resulting in aggravated interface failure.

Keyword: rubber/cord; symmetrical angle laying; finite element; representative volume element; cohesive contact; damage evolution